

CALIBRACIÓN EN TERRENO DE MEDIDORES DE CAUDAL TIPO CORIOLIS

¹Rodrigo Assmann, ²Frederik Baerts, ²Patricio Calderón, ¹Pablo Estremadoyro, ³Francisco García, ³Ruddy Riquelme, ²Jorge Sato, ⁴Rodrigo Veas

¹Endress+Hauser Chile Ltda., María Luisa Santander 447, Providencia, Santiago, Chile.

Rodrigo.Assmann@cl.endress.com; Pablo.Estremadoyro@cl.endress.com

²Electroandina S.A., Leonardo Guzmán 780, Tocopilla, Chile. Frederik.Baerts@electroandina.cl;

Patricio.Calderon@electroandina.cl; Jorge.Sato@electroandina.cl

³CESMEC S.A., Av. Marathon 2595, Macul, Santiago, Chile. fgarcia@cesmec.cl; rriquelme@cesmec.cl

⁴Ingeniería Renacer Ltda., Providencia 2133, Oficina 312, Providencia, Santiago, Chile.

rveas@ingenieriarenacer.cl

RESUMEN

El presente documento trata de las actividades de calibración de medidores de caudal tipo Coriolis en condiciones de terreno. Las calibraciones se realizaron volumétricamente y gravimétricamente de acuerdo a la magnitud en que trabaja cada medidor y siguiendo las recomendaciones del Manual of Petroleum Measurement Standards del American Petroleum Institute. En este documento se presenta esa experiencia y se entregan algunas consideraciones que no están en la referencia anterior y que consideramos conveniente tener presente.

1. INTRODUCCIÓN

La experiencia de calibración que aquí se describe fue realizada en una planta generadora eléctrica Diesel, ubicada en el Desierto de Atacama, cerca de la Comuna de Tocopilla. Los medidores calibrados son utilizados para la cuantificación de dos tipos de combustible adquiridos a un tercero para la producción de electricidad, por lo que es fundamental conocer con una exactitud adecuada sus errores de medida. La metodología aplicada se basó en la sección 5.6 del Manual of Petroleum Measurement Standards de API [1], y en la evaluación de los resultados se consideró modelos de medida basados en las ecuaciones E-3 y E-5 de la misma referencia.

Los combustibles que circulan por los medidores corresponden a petróleo diesel (densidad $\sim 836 \text{ kg/m}^3$ a $15,55 \text{ }^\circ\text{C}$ y $1,01325 \text{ bar}$ de presión absoluta) y fueloil (densidad $\sim 978 \text{ kg/m}^3$ a $15,55 \text{ }^\circ\text{C}$ y $1,01325 \text{ bar}$ de presión absoluta); para cada tipo de combustible se utilizan medidores de caudal distintos. El petróleo diesel se cuantifica en unidades de volumen corregido a las condiciones de referencia $15,55 \text{ }^\circ\text{C}$ y $1,01325 \text{ bar}$ de presión absoluta, mientras que el fueloil se cuantifica en unidades de masa (no masa convencional [2]); el rango de trabajo, en caudal, de los medidores que cuantifican petróleo diesel es 17 a $44 \text{ m}^3/\text{h}$ y el

medidor que cuantifica fueloil trabaja en el valor nominal 51 t/h

En general, toda la actividad implicó un gran esfuerzo de coordinación para aprovechar al máximo el tiempo y los recursos económicos, dados los estrictos requerimientos para el transporte de combustibles y su manejo, además de: cursos de seguridad en cada planta, tramitaciones de permisos, revisiones de ingresos y salidas de los camiones, limitaciones en las jornadas de trabajo de los conductores de los camiones y la lentitud del transporte en caminos de ripio, coordinaciones entre secciones y jefes de turno de las empresas involucradas.

Se menciona esto para dar una cuenta, al menos breve, de las dificultades en terreno, en donde las condiciones para realizar un buen trabajo están condicionadas a las posibilidades materiales, de coordinación e imprevistos; es una advertencia para quienes tengan que realizar un trabajo similar.

2. ELEMENTOS DISPONIBLES

La calibración de los medidores que cuantifican volumen de petróleo diesel fue ejecutada volumétricamente, es decir contra un recipiente patrón, de volumen conocido y abierto a la atmósfera de 2500 L y $0,5 \text{ L}$ de incertidumbre expandida, facilitado por una empresa local de

distribución de combustibles; para las mediciones de temperatura se contó con termocuplas de incertidumbre expandida 0,1 °C.

La calibración del medidor que cuantifica fueloil fue realizada gravimétricamente, utilizando una balanza de camiones, previamente calibrada, de 60 toneladas de capacidad máxima y 10 kg de resolución, ubicada a 30 km de la planta termoeléctrica; el pesaje se hizo en camiones (propiedad de la empresa a la que la planta generadora compra el combustible) cargados con el combustible entregado. Se aprovecharon todos los medios disponibles en una zona apartada, como es el desierto (Fig. 1).



Fig. 1 Transporte de combustible en camiones para pesaje en báscula.

3. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA CORIOLIS

La teoría del efecto Coriolis se encuentra descrita en varios textos, por ejemplo en [3] por lo que no se va a detallar en este documento, aunque indicamos de manera descriptiva que si una masa en movimiento se somete a oscilaciones perpendiculares a su dirección de desplazamiento, aparecen fuerzas de Coriolis que actúan en proporción al caudal másico. En particular, cuando pasa un fluido a través de los tubos osciladores de los medidores, oscilaciones excitadas por bobinas, se generan fuerzas (de Coriolis) que perturban las oscilaciones, deformando los tubos del medidor.

Unos sensores (ver Figura 2) (referencia a la figura 2) situados en la entrada y la salida de los tubos registran el desfase de las oscilaciones, que es proporcional al caudal másico que pasa a través de los tubos.

Según entra un fluido al tubo, las partículas se alejan del centro de rotación Z1 y viajan hacia el

centro de rotación Z2 (como se aprecia en la Figura 2), en consecuencia las fuerzas de Coriolis actúan en direcciones opuestas en la salida y entrada por lo tanto el tubo de medición comienza ondear. Este cambio en el tubo es registrado como una diferencia de fase por los sensores A y B, ubicados en los extremos de los tubos, que es directamente proporcional a la masa del fluido y la velocidad del fluido; por tanto también es proporcional al caudal másico.

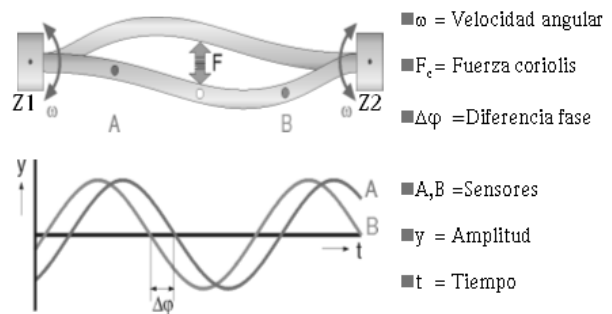


Fig. 2 Representación del efecto Coriolis y señales eléctricas de sensores

Cuando el fluido esta en reposo los tubos oscilan en fase, el caudal másico causa desaceleración de la oscilación en la entrada de los tubos y aceleración en la salida. La diferencia de fase (A,B) se incrementa con un aumento de caudal másico. Los sensores electrodinámicos registran la oscilación de los tubos en la entrada y salida.

Los componentes principales de un medidor Coriolis son los tubos ondeantes, el mecanismo conductor para hacer oscilar los tubos y los detectores de caudal montados a cada lado del mecanismo para la medición del tiempo o la diferencia de fase entre los dos lados del tubo de medición.

Todos los medidores Coriolis comercialmente disponibles usan una bobina y un magneto que sirve de mecanismo de conducción para hacer vibrar los tubos, habitualmente la bobina es montada en un tubo y el magneto en otro. Los tubos generalmente vibran en oposición a su frecuencia natural.

La masa de todo el sistema es la combinación de la masa del fluido atravesando el tubo, la masa del tubo y la masa de todo accesorio sujeta a los tubos tal como el conductor y los detectores de flujo. Para que el medidor tenga una vibración estable, las masas de los dos tubos pueden ser balanceadas o

ajustadas. La suma del mecanismo de conducción y de los detectores deben estar de tal manera que mantengan en equilibrio toda la masa de los tubos. Cambios en la masa del sistema pueden causar que la frecuencia natural del sistema cambie.

Las propiedades elásticas del tubo tienen una directa influencia en la medición de la velocidad del flujo másico. Cuando la temperatura aumenta el material del tubo se vuelve más elástico, cuando la temperatura baja, el material del tubo se vuelve más rígido. Si la temperatura del tubo aumenta mientras la velocidad de flujo del fluido se mantiene constante, el tubo podría deformarse significativamente. Esto podría ser interpretado por los detectores de flujo como un incremento en la velocidad o el caudal másico. Los medidores coriolis tienen un dispositivo sensor de temperatura, típicamente sensores resistivos o "RTDs", colocado en el tubo de medición para determinar la temperatura del material del tubo. Los valores de temperatura son considerados en la programación electrónica del equipo para calcular el caudal másico.

Paralelamente la frecuencia de oscilación de los tubos permite medir directamente la densidad del fluido.

4. CONSIDERACIONES SOBRE LA INSTALACIÓN DE LOS CAUDALÍMETROS

En general, los medidores basados en efecto Coriolis no tienen requerimientos especiales de instalación relacionados con, por ejemplo, una distancia de tramos rectos de tubería antes y después del instrumento. Algunos de ellos, en particular, los utilizados en esta aplicación, son robustos frente a vibraciones causadas por dispositivos externos (motores, bombas, etc.).

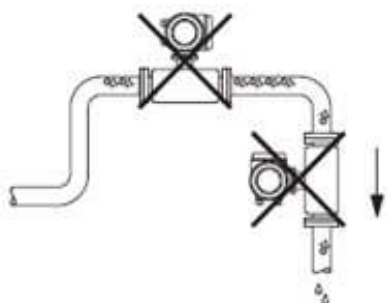


Fig. 3 Tubería con burbujas o semivacía

El mayor cuidado y atención se debe poner en la ubicación y posición de instalación del instrumento,

de tal manera que se evite aquellas situaciones en las que la tubería pueda contener aire o que pueda atrapar "bolsas" de aire. Para lograr esto, se suelen buscar puntos de instalación en las cotas más bajas de la tubería o en posición vertical, si es que la aplicación lo permite. La Figura N° 3 ilustra diferentes situaciones que se deben evitar.

Otra situación que se debe evitar es la acumulación de sólidos en el interior del instrumento de medición. En la Figura 4 se ilustran dos casos particulares de instalación.

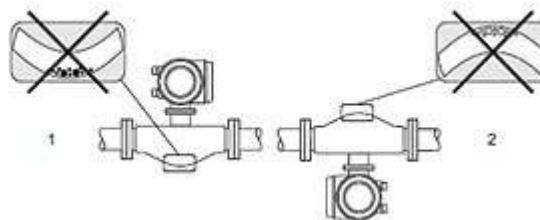


Fig. 4. El caso 1 no es recomendable para fluidos con alto contenido de sólidos. El caso 2 no es recomendable para fluidos que se gasifican fácilmente en las condiciones de proceso.

5. UTILIDAD DE REALIZAR DIAGNÓSTICOS ELÉCTRICOS DURANTE LA CALIBRACIÓN DE LOS MEDIDORES.



Fig. 5 Personal de las distintas empresas involucradas observando la evaluación de las señales eléctricas mediante computador de servicio. Por otra parte, una buena comunicación es relevante para asegurar la coordinación de muchas partes presentes, como lo fue en el caso de esta experiencia.

Durante la calibración de los equipos y para la ocurrencia de desviaciones significativas en las

mediciones, se puede considerar un análisis de las señales eléctricas (Fig. 5), en particular de la corriente de excitación de la bobina de los tubos de medición durante la ejecución misma de la calibración.

Esta señal es un parámetro útil para determinar si las condiciones del proceso de medida en terreno son estables, permite poder verificar el comportamiento de los tubos de medición mientras el fluido esta en circulación. Esta señal se debe mantener en un valor estable mientras las condiciones de flujo no se vean afectadas por cavitación, aire en la línea, sólidos en la línea, etc.

Su valor depende de la viscosidad del fluido, por lo que para diferentes fluidos existen diferentes valores de corriente de excitación.

Evaluar este parámetro fue muy útil en la calibración, para descartar medidas que de otro modo se hubieran considerado como correctas; básicamente, por la forma y ubicación de algunas tuberías antes del medidor, éstas quedaban en el principio vacías, lo que provocaba que durante un tiempo prolongado el fluido que circulaba fuese no homogéneo con presencia de cantidades relevantes de aire. Esta situación se manifiesta mediante un sesgo y mayor variabilidad en la determinación del error de las medidas; si no se cuenta con una medida de esta señal se puede cometer el error de asumir que ambos se deben a una característica del instrumento, más que provocadas por una condición de la instalación, indeseable en la medida que la variabilidad es mayor.

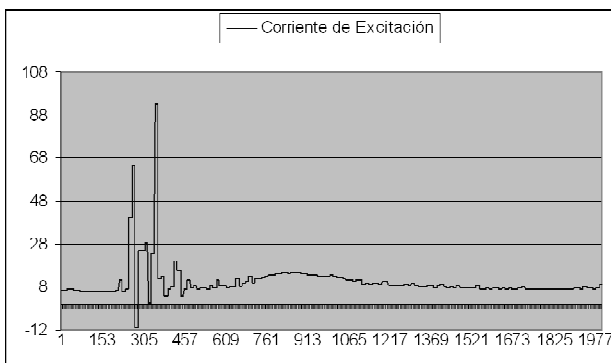


Fig. 6 Corriente de excitación, mediciones con alta variabilidad.

En el caso de calibraciones de medidores nuevos y recién instalados, sin la consideración descrita, es relativamente inmediato justificar la variabilidad y sesgo observados a las condiciones de la

instalación, pero es mucho más difícil concluir lo anterior en el caso de equipos con mayor tiempo de servicio, caso en el que la evaluación de la corriente de excitación es muy recomendable.

Realizando un análisis de la corriente de excitación se pudo determinar si las pruebas se podían considerar válidas o no, esto ya que si la corriente de excitación de la bobina se presentaba variable y con una amplitud muy alta, esto era indicador de que en el interior de las tuberías el fluido estaba mezclado con aire, como se ve en la Figura 6. Estas pruebas no se consideraban y se desechaban.

Pero luego de unas 2 o 3 pruebas, la corriente de excitación de la bobina presentaba un valor estable, como se aprecia en la Figura 7. Por lo que estas pruebas si se utilizaban y eran consideradas para el pesaje.

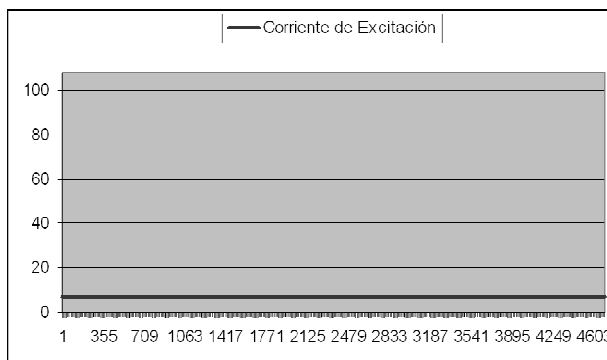


Fig. 7 Corriente de excitación, mediciones aceptables.

7. MODELOS DE MEDIDA

7.1 Calibraciones gravimétricas.

El primer modelo de medida, descrito por E-3 de [1], se aplica a calibraciones realizadas gravimétricamente, en las que se compara las indicaciones, en unidades de masa, del caudalímetro contra las indicaciones de la balanza corregidas por un factor que permite transformarlas a masa; este factor está especificado en la Tabla C-2 de la referencia [1], el cual es necesario tomar en cuenta pues las balanzas no indican masa, sino la masa convencional [2] de objetos cuya densidad es igual a la densidad de los patrones utilizados para ajustar y calibrar un sistema de pesaje, y de manera muy próxima la masa convencional de objetos con densidades diferentes.

Sin embargo los factores recomendados por [1] son aplicables a nivel del mar, o para valores de densidad del aire cercanos a lo que en metrología de masa se denomina “densidad convencional del aire”, ρ_o , que es una constante igual a $1,2 \text{ kg/m}^3$.

A medida que la altura geográfica de un lugar es mayor, disminuye la densidad del aire, ρ_a , y el empuje producido por el mismo, en particular durante el ajuste y calibración de la balanza con masas patrones. A partir de la ecuación (34.13a) de [4] se obtiene la relación entre la indicación de una balanza, I , en kg y el valor de masa, m -de un objeto de densidad ρ - medido en una balanza, también en kg, que ha sido ajustada en masa convencional, en un medio cuyo aire tiene densidad ρ_{aj} con masas patrones de densidad ρ_J :

$$m = I \underbrace{\left(\frac{1 - \rho_o / \rho_c}{1 - \rho_a / \rho} \right)}_{f_1} \underbrace{\left(\frac{1 - \rho_{aj} / \rho_J}{1 - \rho_o / \rho_J} \right)}_{f_2} = I \cdot \underbrace{f_1 \cdot f_2}_f \quad (1)$$

En la ecuación (1), ρ_c , corresponde a una constante denominada “densidad convencional del patrón de masa” y es igual a 8000 kg/m^3 ; en esta ecuación todas las densidades se evalúan en las mismas unidades que ρ_o y ρ_c . Los valores que se pueden obtener mediante (1) difieren entre $-0,01\%$ a $-0,1\%$ respecto de los que se informan en la Tabla C-2 de [1], f_{API} , dependiendo fuertemente de la densidad del aire y esta, a su vez, de la altura geográfica. En la Figura 8 se presenta un gráfico de la relación entre el factor de corrección f , la altura geográfica y la densidad del fluido.

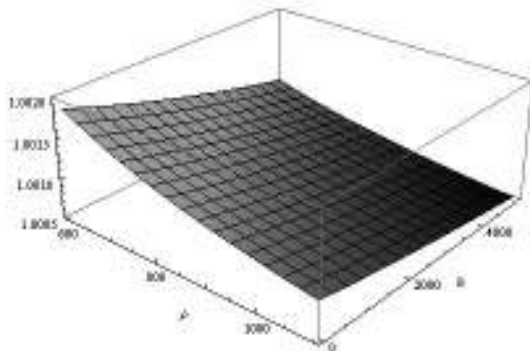


Fig. 8 Dependencia del factor de corrección f , en función de la densidad del fluido, ρ , y la altura geográfica, h , evaluado a partir de la ecuación (1).

En el caso específico de esta experiencia, realizada a ~ 1300 metros sobre el nivel del mar (en donde la temperatura puede variar durante el día entre $-1 \text{ }^\circ\text{C}$ y $35 \text{ }^\circ\text{C}$ con una presión atmosférica de $\sim 87 \text{ kPa}$), la diferencia es de un $-0,03\%$. Nuestra explicación de esta diferencia, basada en comparaciones entre los valores obtenidos a partir de f, f_1 y f_2 y los de la Tabla C-2 de la referencia [1], f_{API} , es que en esta última no se realiza las evaluaciones tomando en cuenta el factor f_2 de la ecuación 1 y se asume una densidad del aire igual a $1,2 \text{ kg/m}^3$, situación que llama la atención considerando que es una cantidad significativa al ser comparada con valores de sesgo del orden de $0,05\%$ dentro de los cuales los fabricantes declaran que equipos pueden funcionar, al menos en condiciones de laboratorio; el segundo factor de la ecuación (1), f_2 , es entonces relevante dependiendo de la exactitud pretendida y altura geográfica.

Para la evaluación del factor del medidor en las calibraciones gravimétricas, MF_m , se utilizó la ecuación E-3 de [1], modificada en su numerador con la expresión (1) del presente documento:

$$MF_m = \frac{I \left(\frac{1 - \rho_o / \rho_c}{1 - \rho_a / \rho} \right) \left(\frac{1 - \rho_{aj} / \rho_J}{1 - \rho_o / \rho_J} \right)}{IM_n} \quad (2)$$

Donde IM_n es la masa indicada por el equipo Coriolis bajo calibración, en las mismas unidades de I . Para efecto de cálculos, asumiremos que $\rho_a = \rho_{aj}$.

Por otra parte, el valor de la densidad del aire se puede estimar a partir de la información disponible de altura geográfica mediante la expresión (E.3-2) de la referencia [5].

En la Tabla 1 se presentan los valores de los factores f, f_1 y f_2 con la finalidad dar al lector una idea del efecto de cada uno en el valor final de MF_m para las condiciones ambientales durante el trabajo; también se indica la diferencia porcentual entre f y f_{API} . Es posible apreciar que según la densidad del fluido es menor, mayor efecto tienen estos factores, excepto f_2 , que queda determinado por las condiciones ambientales y la densidad de la pesa utilizada para ajustar la balanza.

Tabla 1. Factores f, f_1 y f_2 y diferencia porcentual de f contra el factor informado, f_{API} , en Tabla C-2 de [1] para las condiciones de ejecución de las pruebas: altura sobre el nivel del mar igual a 1300 m, densidad del aire: 1,032 kg/m³; densidad de la pesa de ajuste 7800 kg/m³ ($f_2 = 0,99987$).

ρ / kg/m ³	f_1	f	f_{API}	$\frac{f - f_{API}}{f_{API}}$
2000	1,00037	1,00023	1,0005	-0,03%
1900	1,00039	1,00026	1,0005	-0,02%
1800	1,00042	1,00029	1,0005	-0,02%
1700	1,00046	1,00033	1,0006	-0,03%
1600	1,00050	1,00036	1,0007	-0,03%
1500	1,00054	1,00041	1,0007	-0,03%
1400	1,00059	1,00046	1,0007	-0,02%
1300	1,00064	1,00051	1,0008	-0,03%
1200	1,00071	1,00058	1,0009	-0,03%
1100	1,00079	1,00066	1,0009	-0,02%
1000	1,00088	1,00075	1,0011	-0,03%
900	1,00100	1,00087	1,0012	-0,03%
800	1,00114	1,00101	1,0014	-0,04%
700	1,00133	1,00119	1,0016	-0,04%
600	1,00157	1,00144	1,0019	-0,05%
500	1,00192	1,00179	1,0023	-0,05%

En la Tabla 2 se presenta la misma información, que en la Tabla 1, pero considerando una altura geográfica mayor. Comparando ambas tablas se puede observar que el valor absoluto de la diferencia entre f y f_{API} aumenta a medida que aumenta la altura y esta variación es mayor en la medida que la densidad del fluido es menor.

7.2 Calibraciones volumétricas

El segundo modelo de medida, descrito por E-5 de [1] se aplica a calibraciones volumétricas en las que se compara las indicaciones del medidor, en unidades de volumen, contra las del patrón volumétrico. De acuerdo al modelo, las indicaciones del medidor y del patrón son corregidas a las condiciones de referencia, mediante factores que consideran la temperatura y presión a las que se encuentra el líquido cuando circula por el medidor y cuando está en el patrón volumétrico; estos factores están señalados en [1] y sus valores están especificados en [6]; a su vez el volumen del patrón también se corrige para compensar los efectos de la temperatura y presión del líquido en las paredes.

Tabla 2. Factores f, f_1 y f_2 y diferencia porcentual de f contra el factor informado, f_{API} , en Tabla C-2 de [1] para las siguientes condiciones: altura sobre el nivel del mar igual a 4000 m, densidad del aire: 0,754 kg/m³; densidad de la pesa de ajuste 7800 kg/m³ ($f_2 = 0,99990$).

ρ / kg/m ³	f_1	f	f_{API}	$\frac{f - f_{API}}{f_{API}}$
2000	1,00023	1,0001	1,0005	-0,04%
1900	1,00025	1,0002	1,0005	-0,03%
1800	1,00027	1,0002	1,0005	-0,03%
1700	1,00029	1,0002	1,0006	-0,04%
1600	1,00032	1,0002	1,0007	-0,05%
1500	1,00035	1,0003	1,0007	-0,04%
1400	1,00039	1,0003	1,0007	-0,04%
1300	1,00043	1,0003	1,0008	-0,05%
1200	1,00048	1,0004	1,0009	-0,05%
1100	1,00054	1,0004	1,0009	-0,05%
1000	1,00060	1,0005	1,0011	-0,06%
900	1,00069	1,0006	1,0012	-0,06%
800	1,00079	1,0007	1,0014	-0,07%
700	1,00093	1,0008	1,0016	-0,08%
600	1,00111	1,0010	1,0019	-0,09%
500	1,00136	1,0013	1,0023	-0,10%

Para la evaluación del factor del medidor en las calibraciones volumétricas, MF_v , se utilizó la ecuación E-5 de [1]:

$$MF_v = \frac{V \times CTS_p \times CPS_p}{IV_m} \times \frac{CTL_p \times CPL_p}{CTL_m \times CPL_m} \quad (3)$$

Donde,

V es el volumen indicado por el patrón volumétrico [m³] según la escala graduada, calibrada para una temperatura de referencia, típicamente 15,55 °C.

CTS_p Factor de corrección por expansión térmica del patrón volumétrico, adimensional.

CPS_p Factor de corrección por expansión por presión del patrón volumétrico, debida a la presión del fluido, adimensional.

CTL_p Factor de corrección por expansión térmico del fluido en el patrón volumétrico, adimensional.

CPL_p Factor de corrección por presión del fluido en el patrón volumétrico, adimensional.

CTL_m Factor de corrección por expansión térmico del fluido en el instrumento bajo calibración, adimensional.

CPL_m Factor de corrección por presión del fluido en el instrumento bajo calibración, adimensional.

IV_m es la indicación del medidor bajo calibración [m^3]

Los valores de los coeficientes CTL_i y CPL_i se obtienen de la referencia [6], en la cual CTL_i se evalúa mediante el cociente entre la densidad del fluido a la temperatura observada y la densidad del fluido a la temperatura de referencia (15,55 °C); en ambos casos, los valores de densidad están evaluados a una presión absoluta de 1,01325 bar. Mientras, CPL_i se evalúa como el cociente entre la densidad del fluido a la presión observada y la densidad del fluido a la presión de referencia; en ambos casos, los valores de densidad están evaluados a la temperatura de referencia. La incertidumbre asociada a estos factores se estimó considerando las recomendaciones de [7] para valores tabulados.

7.3 Evaluación de incertidumbre de MF_m y MF_v

Tabla 3. Evaluación del factor del medidor. Método gravimétrico. Se presentan las contribuciones porcentuales a la incertidumbre estándar.

Factor promedio	0,992 3
Incertidumbre estándar combinada del factor del medidor	0,000 4
Variable	Contribución
Indicación de la balanza para el camión vacío	0,091%
Indicación de la balanza para el camión lleno	0,491%
Factor de empuje	0,001%
Cantidad derramada	0,000%
Indicación inicial del equipo bajo calibración (se considera la resolución).	<0,001%
Indicación final del equipo bajo calibración (se considera la resolución).	<0,001%
Desviación estándar de la media de las pruebas	99,417%
Total	100,000%

Tabla 4. Evaluación del factor del medidor. Método volumétrico. Se presentan las contribuciones porcentuales a la incertidumbre estándar.

Factor promedio	0,999 8
Incertidumbre estándar combinada del factor del medidor	0,000 6
Variable	Contribución
Volumen indicado según la escala graduada del patrón volumétrico, calibrada para 15,55 °C.	23,639%
CTS_P	0,012%
CPS_P	0,005%
CTL_P	0,145%
CPL_P	0,001%
CTL_m	11,769%
CPL_m	0,001%
Indicación inicial del medidor	4,977%
Indicación final del medidor	4,977%
Desviación estándar de la media de las pruebas	54,474%
Total	100,000%

La evaluación de la incertidumbre de los factores MF_m y MF_v se realizó de acuerdo a las recomendaciones de [8]; la determinación de las derivadas parciales de la expresión (4.1) de [8] se ejecutó siguiendo la recomendación de la sección 4.2 del mismo documento, que corresponde a un método numérico de evaluación de diferencias finitas.

Dado que la metodología entregada por la referencia [8] es bien comprendida en el ámbito metrológico y no tenemos aportes relevantes sobre ella, no entregaremos mayores detalles en este documento, excepto una mención a las contribuciones relativas de los factores de influencia en la determinación de la incertidumbre estándar combinada de cada factor, según las condiciones de trabajo. Esta información aparece en las Tablas 3 y 4. La incertidumbre expandida fue evaluada finalmente utilizando un factor de cobertura $k=2$, por lo que se obtuvieron resultados con una incertidumbre expandida igual a ~0,1% y hasta ~0,2% en el caso de otros no presentados aquí.

En la referencia [9] se entrega un archivo en MS Excel para la evaluación del factor del medidor. La

clave es 3889. La finalidad es facilitar un ejemplo de las evaluaciones implementadas en Excel a las a las personas interesadas, para que a partir ellas se les facilite el desarrollar las suyas.

6. CONCLUSIÓN

Se ha documentado una experiencia en la calibración de medidores de Coriolis en terreno, actividad que requiere de un esfuerzo significativo de coordinación y de buena comunicación.

Además se ha indicado la conveniencia de realizar análisis de las señales durante la ejecución de las calibraciones, junto con una evaluación de la corrección de empuje según la altura geográfica, aspecto que no está considerado en 5.6 del Manual of Petroleum Measurement Standards.

La incertidumbre expandida ($k=2$) relativa de medida alcanzada en las pruebas realizadas fue aproximadamente $\sim 0,1\%$ a $0,2\%$

REFERENCIAS

- [1] Measurement of Liquid Hydrocarbons by Coriolis Meters. American Petroleum Institute. API Publishing Services, 2002, Manual of Petroleum Measurement Standards, Chapter 5.6
- [2] International Organization of Legal Metrology. Conventional value of the result of weighing in air. OIML Documents. <http://oiml.org/publications/D/D028-e04.pdf>. OIML D 28 Edition 2004 (E).
- [3] Landau, L.D. y Lifshitz, E.M. Mechanics. 3rd. Butterworth-Heinenann. pág. 128.
- [4] M. Kochsiek, M. Gläser (eds.). Comprehensive Mass Metrology. WILEY-VCH, 2000.
- [5] International Organization of Legal Metrology. Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3 Part 1: Metrological and technical requirements. OIML Publications. <http://www.oiml.org/publications/R/R111-1-e04.pdf>. OIML R 111-1 Edition 2004 (E).
- [6] Temperature and Pressure Volume Correction Factors for Generalized Crude Oils, Refined Products, and Lubricating Oils. American Petroleum Institute. API Publishing Services, 2004, Chapter 11.1.
- [7] Lira, Ignacio. Evaluating the Measurement Uncertainty. Bristol: IOP Publishing, 2002. págs. 76-79.
- [8] European co-operation for Accreditation. Expression of the Uncertainty of Measurement

in Calibration. www.european-accreditation.org/n1/doc/ea-4-02.pdf. EA-4/02. www.metrologia.cl. <http://www.metrologia.cl/medios/articulo1244.xlsx>.